

Инерциальные системы отсчета играют особую роль не только в механике, но и во всех других разделах физики. Это связано с тем, что, согласно специальной теории относительности, математическое выражение любого физического закона должно иметь один и тот же вид во всех инерциальных системах отсчета. Поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться только инерциальными системами отсчета, не оговаривая этого каждый раз. Особенности описания закономерностей движения материальной точки относительно неинерциальной системы отсчета специально рассмотрены в VII главе.

§ 2.2. Сила

1. Из опыта известно, что в результате действия на тело со стороны других тел это тело может изменять состояние своего механического движения, а также форму и размеры, т. е. деформироваться. Для описания такого механического действия тел друг на друга вводят понятие силы. **Силой**, действующей на тело (или приложенной к телу), называют физическую величину, являющуюся мерой механического действия на это тело со стороны какого-либо другого тела. Таким образом, движение тела под действием других тел можно рассматривать как движение тела под действием приложенных к нему сил.

Толкая тележку, поднимая груз, растягивая пружину, мы действуем на эти тела с некоторой силой. Электровоз приводит в движение состав, прикладывая к нему силу тяги. Очень часто в механике приходится встречаться с силами тяжести и трения. Сила, приложенная к телу, полностью определена, если указаны ее численное значение, направление действия и точка приложения. Прямую, проведенную через точку приложения силы в направлении действия этой силы, называют **линией действия силы**.

2. Для определения численного значения силы, т. е. для сравнения ее с силой, принятой за единицу силы, можно воспользоваться вызываемыми ими деформациями одного и того же упругого тела. На этом принципе основаны известные из курса средней школы пружинные весы и динамометры. Измерение сил с помощью пружинного динамометра нуждается в некоторых дополнительных пояснениях. При пользовании таким динамометром предполагается, что численное значение измеряемой силы F , действующей вдоль оси пружины, пропорционально величине x вызываемой ею деформации пружины:

$$F = kx, \quad (2.1)$$

где k — так называемый коэффициент упругости пружины.

Если зависимость (2.1) неверна, то измерять силы с помощью пружинного динамометра нельзя, так как зависимость x от F неизвестна и динамометр невозможно проградуировать. Следовательно, прежде чем пользоваться пружинным динамометром, нужно убедиться в справедливости соотношения (2.1). Для этого на динамометр поочередно действуют двумя разными по величине, но одинаково направленными

силами F_1 и F_2 (например, подвешивая к динамометру два разных груза), а затем — одновременно обеими силами F_1 и F_2 , т. е. силой $F_3 = F_1 + F_2$. Соответствующие деформации обозначим через x_1 , x_2 и x_3 . Из уравнения (2.1) следует, что

$$x_1 = \frac{F_1}{k}, \quad x_2 = \frac{F_2}{k} \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{F_3}{k},$$

т. е.

$$x_3 = x_1 + x_2.$$

Согласие значений x_1 , x_2 и x_3 , найденных из опыта, с этой формулой является косвенной проверкой справедливости уравнения (2.1). Такого рода опыты показали, что при достаточно малых деформациях x , т. е. при действии на пружину не слишком больших сил F , соотношение (2.1) выполняется с большой степенью точности. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в § 5.2.

3. Две силы называют численно равными и противоположными по направлению, если одновременное приложение этих сил в одной и той же точке тела не вызывает изменения его механического движения. В частности, если до приложения таких двух сил тело покоилось, то оно продолжает оставаться в покое и после их приложения. Поэтому говорят, что две численно равные и противоположные по направлению силы, приложенные в одной и той же точке тела, **взаимно уравновешиваются**.

Уравновешивая измеряемую силу с помощью пружинного динамометра, можно определить как численное значение силы, так и ее направление. Если пружина динамометра сжата, то сила, приложенная к телу, направлена вдоль оси пружины от тела к динамометру, если пружина растянута, то сила направлена в обратную сторону.

Опыты показывают, что две силы, приложенные одновременно в одной и той же точке тела, можно уравновесить одной силой. Эта сила численно равна и противоположна по направлению геометрической сумме указанных двух сил, определяемой по известному правилу параллелограмма. Следовательно, силы складываются по правилу сложения векторов, т. е. сила — величина векторная.

Если на тело одновременно действуют n сил F_1, F_2, \dots, F_n , приложенных в одной и той же точке A тела, то их можно заменить одной эквивалентной им силой F , равной их геометрической сумме:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i$$

и приложенной в той же точке A . В частности, это верно для системы сил, действующих на материальную точку. Силу F называют **результатирующей**, или **равнодействующей**, силой. Очевидно, что силы, приложенные в одной и той же точке тела, взаимно уравновешиваются в том и только в том случае, если результирующая этих сил равна нулю.

Действие силы на абсолютно твердое тело не изменяется при переносе ее точки приложения вдоль линии действия силы.

4. До сих пор мы рассматривали только статический метод измерения сил, основанный на уравнивании измеряемой силы силой, нам известной (например, силой, действующей со стороны эталонной пружины — динамометра). Между тем действие силы на тело может проявляться не только статически, но также и динамически в изменении состояния механического движения тела. Поэтому возможен также динамический метод измерения сил путем сравнения изменений движения одного и того же эталонного тела, вызываемых измеряемой силой и силой, принятой за единичную. Однако для осуществления этого метода измерения сил нужно предварительно знать закон изменения движения тел под действием сил. Таким законом для материальной точки и абсолютно твердого тела, движущегося поступательно, является второй закон Ньютона. Основываясь на нем, можно, конечно, производить измерение сил, как это обычно и делают. Но в то же время совершенно ясно, что при установлении самого второго закона нужно было пользоваться не связанным с ним методом измерения сил.

5. Тело называют **свободным**, если оно может занимать всевозможные положения в пространстве и двигаться любым образом. Например, космический корабль в процессе полета ведет себя как свободное тело.

В большинстве случаев движущиеся тела не являются свободными. Так, шарик, подвешенный на нерастяжимой нити, не может удалиться от точки подвеса на расстояние, превосходящее длину нити. Поршень двигателя внутреннего сгорания может двигаться в цилиндре двигателя только поступательно, а коленчатый вал того же двигателя, наоборот, может только вращаться. Поезд движется только вдоль железнодорожного пути. Всякие ограничения на возможные положения или движения тела называют **связями**, наложенными на это тело. Связи осуществляются путем воздействия на рассматриваемое тело со стороны других тел, соприкасающихся или скрепленных с ним. Так, в примерах, приведенных выше, связи осуществляются: в первом — нитью, во втором — стенками цилиндра и шатуном, в третьем — подшипниками коленчатого вала, в четвертом — рельсами.

6. При исследовании движения несвободных тел в динамике широко пользуются следующим приемом, называемым **принципом освобожденности**: *несвободное тело (или систему тел) можно рассматривать как свободное, если отбросить все наложенные на него связи и заменить действие тел, осуществляющих связи, соответствующими силами.*

Эти силы называют **реакциями связей**, а все остальные силы, действующие на тело, — **активными силами**. Так, например, задача о движении шарика, подвешенного на нерастяжимой нити, сводится к задаче о движении свободного шарика, т. е. отсоединенного от нити, на который помимо всех активных сил действует еще сила реакции нити. В отличие от активных сил, которые в каждой конкретной задаче должны быть заданы, реакции связей (например, реакция нити) заранее неизвестны. Они подлежат определению в ходе решения зада-

чи. Их значения должны быть такими, чтобы реакции связей совместно с активными силами вызывали такое движение «освобожденного» тела, которое полностью согласуется с ограничениями, накладываемыми связями на рассматриваемое несвободное тело. Так, при скатывании или соскальзывании шарика по наклонной плоскости на него действуют сила тяжести и реакция плоскости, которую обычно бывает удобно представить в виде суммы двух составляющих — нормальной к плоскости (нормальная реакция) и касательной (сила трения). Под действием силы тяжести и реакции плоскости шарик должен двигаться так, чтобы его центр все время находился на одном и том же расстоянии от плоскости, равном радиусу шарика. Если же шарик скатывается без проскальзывания, то, кроме того, должно выполняться еще одно условие: скорость точки касания шарика о плоскость должна быть равна скорости соответствующей точки плоскости.

Принцип освобожденности непосредственно вытекает из самого понятия силы, как меры механического действия тел друг на друга. Ведь тела, осуществляющие связи, именно потому и ограничивают движение рассматриваемого тела, что действуют на него с некоторыми силами — реакциями связей.

В дальнейшем, рассматривая закономерности движения тел под действием сил, мы всегда будем пользоваться принципом освобожденности. Иными словами, мы всегда будем считать, не оговаривая этого особо, что рассматриваемое тело свободно, а под действующими на него силами будем понимать совокупность всех активных сил, так и всех реакций связей, если в действительности тело несвободно.

§ 2.3. Масса. Второй закон Ньютона

1. Основная задача динамики заключается в установлении законов изменения механического движения тел под влиянием приложенных к ним сил. Опыты показывают, что под действием силы \mathbf{F} свободное тело изменяет скорость своего поступательного движения, приобретая ускорение \mathbf{a} . При этом выполняется следующий закон¹: *ускорение тела прямо пропорционально вызывающей его силе и совпадает с ней по направлению*, т. е.

$$\mathbf{a} = k_1 \mathbf{F}, \quad (2.2)$$

где k_1 — положительный коэффициент пропорциональности, постоянный для каждого конкретного тела, но, вообще говоря, неодинаковый для разных тел. Кроме того величина k_1 зависит, конечно, от выбора единиц измерения силы и ускорения.

2. Из соотношения (2.2) следует, что тела, действительно, обладают свойством инертности. Ведь именно благодаря своей инертности тело приобретает под влиянием силы *к о н е ч н о е* по величине ускорение, т. е. изменяет скорость своего поступательного движения не мгновенно, а лишь *п о с т е п е н н о*.

¹ При скоростях движения тел $v \ll c$, где c — скорость света в вакууме.